地形因子对 FAST 周边喀斯特植物多样性及空间分布的影响

张婷[1]，张建利[1*]，杨涛[1]，张晨[1]，溥丽华[1,2]，赵卫权[3]

（1. 贵州民族大学 生态环境工程学院，贵阳 550025；2. 共青团贵州民族大学委员会，贵阳 550025；3. 贵州省山地资源研究所，贵阳 550001）

摘要：为探究地形因子对 FAST（Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope）周边植物物种多样性及空间分布的影响，该文选取 FAST 周边喀斯特峰丛洼地 3 种典型植物群落（乔木层、灌木层、藤本层）作为研究对象，采用方差分析及典范对应分析（CCA）研究不同地形因子（海拔、坡度、坡向、坡位）梯度下植物群落物种多样性及空间分布特征。研究结果表明：（1）FAST 周边植物群落α多样性指数呈现灌木层>乔木层>藤本层的趋势，乔木层、藤本层植物α多样性指数随海拔升高逐渐增加（P<0.05），地形因子对灌木层植物α多样性无显著性影响。（2）FAST 周边植物群落物种的空间分布受海拔的影响最大，其次为坡度（P<0.05）。（3）FAST 周边植物群落沿海拔、坡度的β多样性指数均呈现藤本层>灌木层>乔木层的变化趋势，3 种植物群落的 Jaccard 相似性指数随海拔的升高呈现增加的趋势，沿坡度的增加呈现先升高后降低的趋势。综上所述，物种对生境的选择具有差异性，海拔和坡度是影响 FAST 周边喀斯特峰丛洼地植物群落空间分布的关键因子。

关键词：喀斯特峰丛洼地，地形因子，物种多样性，空间分布，FAST

中图分类号 Q948　　**文献标志码：**A　　文章编号：

Influence of topographic factors on the plant diversity and spatial distribution of Karst around FAST

ZHANG Ting[1], ZHANG Jianli [1*], YANG Tao[1], ZHANG Chen[1], PU Lihua[1,2], ZHAO Weiquan[3]

(1.*College of Eco-Environmental Engineering, Guizhou Minzu University*, Guiyang 550025, China; 2. *The Communist Youth League Committee of Guizhou Minzu University*, Guiyang 550025, China; 3. *Institute of Mountain Resources of Guizhou Province*, Guiyang 550001, China)

Abstract: To explore the influence of topographic factors on the diversity and spatial distribution of plant species around FAST (Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope), three typical plant communities (tree layer, shrub layer, vine layer) in the Karst peak-cluster depression around FAST were selected as the study objects, and ANOVA and Canonical Correspondence Analysis (CCA) were used to investigate the species diversity and spatial distribution of plant communities under different topographic factors (altitude, slope, aspect, and gradient). The results were as follows: (1) The α-diversity index of plant communities around FAST shows a trend of shrub layer > tree layer > vine layer, and the α-diversity index of plants in the tree layer and vine layer gradually increases with altitude (P<0.05), while the topographic factor has no significant effect on the α-diversity of plants in shrub layer. (2) The spatial distribution of plant community species around FAST was most influenced by the altitude, followed by the slope. (P<0.05) (3) The β-diversity indices of the plant communities around FAST show a trend of vine layer > shrub layer > tree layer along the altitude and slope. The Jaccard similarity index above 70% is extremely dissimilar and moderately dissimilar at altitude and slope gradients. The Jaccard similarity index of the three plant communities tended to increase with altitude and then decrease along the slope. In summary, species differ in their habitat selection, and altitude and slope are key factors affecting the spatial distribution of plant communities in the Karst depressions around FAST. Species diversity can better reflect the differences in plant communities in terms of species composition. Species diversity is not only influenced by topographic factors, but also related to biotic and abiotic factors, such as temperature, precipitation, human activities, and functional plant traits. Therefore, corresponding environmental factors need to be added in future studies to further investigate the intrinsic mechanisms of plant species diversity and species spatial distribution at the regional scale

---

基金项目：贵州省科学技术重点基金项目([2019]1421)；贵州省科技支撑计划项目([2021]460)；贵州科学院省级科研专项([2021]03) [Supported by Guizhou Science and Technology Key Fund Project ([2019]1421); Guizhou Science and Technology Support Program Project ([2021] 460); Provincial Research Special Project of the Academy of Sciences of Guizhou ([2021]03)]。

第一作者：张婷(1997 -)，硕士研究生，研究方向为喀斯特异质生境生物多样性，（E-mail）1160499906@qq.com。

***通信作者：**张建利，博士，副研究员，研究方向为喀斯特石漠化生态修复，（E-mail）zhangjl-z@163.com。

and to strengthen the ecological protection of the surrounding area, improve the forest composition, and provide a good natural environment around FAST and in the Karst peak-cluster depression.
Keywords: karst peak-cluster depression, topographical factor, species diversity, spatial distribution, FAST

物种多样性是用来衡量一定区域内生物资源丰富程度的客观性指标，能够反映植物群落内部的结构多样性和空间异质性。生态系统中物种多样性越高，群落结构越复杂，抗干扰能力越强，则稳定性越高(Loreau et al., 2013；张柳桦等，2018；杨扬等，2019)。植物群落的空间异质性是由生物学和生态学特性的各因素共同作用形成，对植物群落环境因素的研究有利于分析种群的分布格局，能更好的经营和管理植物群落(张仕豪，2020)。众多环境因素中，地形因子对植物种群的空间分布、群落演替以及生态修复等影响一直是生态学研究领域的重要内容(龙翠玲，2007；王洪丹，2016)。地形因子的差异导致了生态环境的差异性，为群落中物种的共存提供了有利的条件，有助于维持植物群落生物多样性(黄甫昭等，2016)。海拔作为重要的环境因素之一，其变化规律对植物物种多样性的影响是生态学热点问题之一(张荟荟，2008)。物种沿海拔梯度的数量特性能综合反映物种的空间分布特征，进而反映物种对环境的适应能力(郝建锋等，2014)。坡位是坡面尺度上的一个重要地形条件，指的是自然坡面的不同位置(朱羚等，2018)。坡度主要影响太阳的投射角，从而对其它环境因素产生影响，坡度较缓的区域土层较厚，酸碱性适宜，水分充足，无机盐的流失缓慢(温佩颖和金光泽，2019)。坡向能改变植物生长过程中的诸多生境因子，如光照、温度、水分和土壤等，从而影响物种多样性(张起鹏，2019)。目前，地形因子对物种多样性的影响研究尺度较单一，大多数研究集中于单一的海拔(赫建峰等，2014；黄甫昭等，2016；何斌等，2021)、坡度(李成俊等，2013)、坡向(牛钰杰等，2017)、坡位(朱羚等，2018)，针对喀斯特地区植物群落物种多样性多层次尺度的研究鲜有报道，尤其是喀斯特峰丛洼地地区植物群落与地形因子之间关系的研究相对较少。

喀斯特峰丛洼地是岩溶山区典型地貌类型之一，主要分布在我国西南地区，其生态系统较脆弱，稳定性和抗干扰能力较差，生态环境破碎，因此具有高度的异质性特征（彭晚霞等，2008；盛茂银等，2015）。森林生态系统作为陆地生态系统的重要类型之一，其不仅具有涵养水源、减少水土流失的功能，还具有调节气候、降低风速、促进浮尘沉降的作用（王兵等，2011）。FAST（Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope）作为世界上最大的天文望远镜，选址于典型喀斯特峰丛洼地的大窝凼，担任着许多重大的天文观测任务，其运行过程需要一个相对稳定的自然环境，因此，植物群落稳定性和生态安全对于 FAST 周边的生态建设和保护显得尤为重要(赵祖伦等，2020)。虽然国内外已经进行了很多关于地形因子对植物物种多样性及空间分布影响的相关研究，但针对喀斯特峰丛洼地地区地形因子对植物群落物种多样性及空间分布的影响研究鲜有报道。

本研究以 FAST 周边典型喀斯特峰丛洼地为研究区域，依托典型样地调查法获取物种数据并计算多样性指数，采用方差分析及典范对应分析检验研究结果，通过分析地形因子中海拔、坡度、坡向、坡位对不同植物群落物种多样性及空间分布的影响，拟探讨以下问题：（1）地形因子对植物群落α多样性的影响如何？（2）地形因子对植物群落空间分布的解释如何？（3）地形因子梯度下的β多样性特征。旨在为喀斯特峰丛洼地地区森林植物群落的稳定性及维持机制提供数据支撑。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域概况

研究区位于贵州省黔南布依族苗族自治州平塘县克度镇，该区域属于云贵高原东南向广西丘陵过渡地带，周边为典型喀斯特峰丛洼地地貌，该区域为中亚热带季风湿润气候区，植被属于中亚热带常绿阔叶林地带。FAST 周边植物群落调查样地区域为 106º48′24″ - 106º53′05″ E、25º30′18″ - 25º38′47″ N，植被类型以阔叶林、灌丛为主，降雨充沛，年均降雨在 1 217 mm 左右，年平均气温约为 17 ℃，无霜期达 312 d，年均日照时间 1 065.7 h，土壤主要以石灰土、黄壤土主，岩石裸露率为 25 % ~ 40 %(谢刚等，2018)。主要乔木有枫香树（*Liquidambar formosana*）、麻栎（*Quercus acutissima*）、青冈（*Cyclobalanopsis glauca*）等，主要灌木有异叶鼠李（*Rhamnus heterophylla*）、黄花恋岩花（*Echinacanthus lofouensis*）、香叶树（*Lindera communis*）、白瑞香（*Daphne papyracea*）等，主要藤本有藤黄檀（*Dalbergia hancei*）、飞龙掌血（*Toddalia asiatica*）、菝葜（*Smilax china*）、雀梅藤（*Sageretia thea*）等。

1.2 样地设置和调查

于 2015 年 10 月中旬，采用典型样地调查法进行植物群落调查，设置 20 m × 20 m 的调查样地，调查样地内设置 10 个 4 m × 10 m 的乔木物种调查样方(宋同清等，2010；陈吉泉和阳树英，2014)，同时设置 5 个 5 m × 5 m 的灌木和藤本植物调查样方（草本植物群落结构简单，故不设样方），共设置植物群落调查样地 26 个。调查样地内乔木物种胸径大于 5 cm 的植株进行每木尺检，对胸径小于 5 cm 的乔木、灌木和藤本物种测量其地径，分别记录样方内的物种名称、高度、胸径（地径）及数量等，同时记录调查样地的盖度、海拔、坡向、坡度、坡位等信息(吴华等，2013；张建利等，2013)。

1.3 地形因子的划分标准

根据典型植物群落调查样地信息，将 26 个样地按不同地形因子（海拔、坡度、坡向、坡位）进行划分，如表 1 所示(李芹等，2019；田奥等，2021)。

表 1　地形因子划分标准表

Table 1　Standard table of division of topographical factor

地形因子 Topographical factor	划分等级 Classification	划分标准 Criteria for the classification	样地数量/个 Number of plots
海拔 Altitude （m）	低海拔 Low altitude	700 ~ 900	7
	中海拔 Medium altitude	900 ~ 1100	15
	高海拔 High altitude	> 1100	4
坡度 Slope （°）	平坡 Flat slope	0 ~ 5	4
	缓坡 Gentle slope	6 ~ 15	1
	斜坡 Slope	16 ~ 25	5
	陡坡 Steep slope	26 ~ 35	3
	急坡 Sharp slope	36 ~ 45	5
	险坡 Risky slope	> 45	8
坡向 Aspect （°）	阴坡 Shady aspect	337.5 ~ 22.5, 22.5 ~ 67.5	10
	半阴坡 Semi-shady aspect	67.5 ~ 112.5, 292.5 ~ 337.5	4
	阳坡 Sunny aspect	157.5 ~ 202.5, 205.5 ~ 247.5	5
	半阳坡 Semi-sunny aspect	112.5 ~ 157.5, 247.5 ~ 292.5	7
坡位 Gradient	坡顶 Top of the gradient		4
	上坡 Uphill		5
	中坡 Mid gradient		9
	下坡 Downhill		8

1.4 数据处理

1.4.1 重要值计算

喀斯特典型植物群落乔木层、灌木层、藤本层植物物种重要值（importance value，*IV*）计算公式为(龙文兴，2016)：

$$IV = (\text{相对密度} + \text{相对频度} + \text{相对优势度})/3$$

式中，相对密度为样方中某一物种个体数占全部物种个体数的比例；相对频度为样方中某一物种频度占全部物种频度的比例；相对优势度为样方中某一物种个体胸高断面积（灌木、藤本采用基盖度）占全部物种胸高断面积（基盖度）的比例。

1.4.2 多样性测度

采用 Margalef 丰富度指数（*R*）、Simpson 优势度指数（*D*）、Shannon-Wiener 多样性指数（*H'*）、Pielou 均匀度指数（*E*）对喀斯特峰丛洼地植物群落α多样性指数进行分析(马佳明等，2021；殷丽峰等，2021)；采用 Jaccard 相似性系数（C_j）对植物群落β多样性指数进行分析。Jaccard 相似性指数取值在 0 ~ 1 之间，数值越大表示两个植物群落的相似程度越高，当 $0 < C_j < 0.25$ 为极不相似、$0.25 < C_j < 0.50$ 为中等不相似、$0.50 < C_j < 0.75$ 为中等相似、$0.75 < C_j < 1$ 为极相似(马佳明等，2021)。

α多样性指数：

$$R = \frac{S-1}{\ln N}$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^{S} (Pi)^2$$

$$H' = -\sum_{i=1}^{S} (P_i \ln P_i)$$

$$E = \frac{H}{\ln S}$$

式中：S 为植物群落中物种总数目，N 是样地群落中全部物种个体总数，P_i 为第 i 种的相对重要值。

β多样性指数：

$$C_j = \frac{c}{a+b-c}$$

式中：c 为 2 个样地的共有物种数，a 和 b 分别为样地 A 和 B 的物种数。

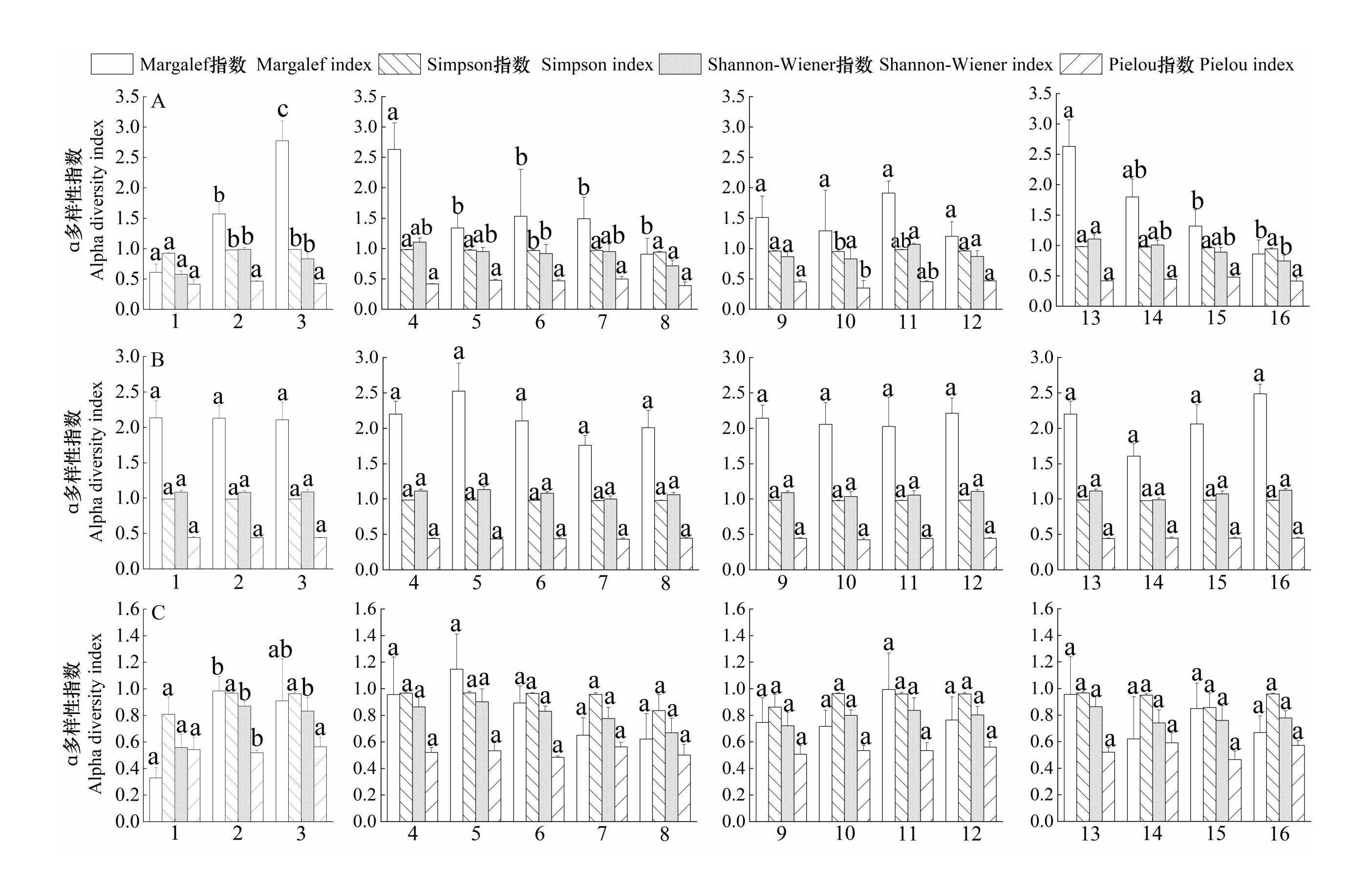
1.5 数据分析

采用 SPSS 26.0 软件对数据进行正态性检验和方差齐性检验，对不符合检验的数据进行转换后再检验，采用单因素方差分析（One-way ANOVA）对α多样性指数的差异进行检验，多重比较采用 Tukey 法（P<0.05）。典范对应分析（canonical correspondence analysis，CCA）使用 Canoco 5.0 软件，绘图使用 Origin 2018 软件。CCA 分析中地形因子采用数字等级赋值，平坡表示为 1，缓坡表示为 2，斜坡表示为 3，陡坡表示为 4，急坡表示为 5，险坡表示为 6；阴坡表示为 1，半阴坡表示为 2，半阳坡表示为 3，阳坡表示为 4；下坡表示为 1，中坡表示为 2，上坡表示为 3，顶坡表示为 4，其它的环境数据采用实测值。

2 结果与分析

2.1 地形因子对 FAST 周边植物群落α多样性的影响

对 FAST 周边典型喀斯特植物群落α多样性分析如图 1 所示（由于缓坡样地数量的单一，故未进行方差分析），α多样性指数呈现灌木层＞乔木层＞藤本层的趋势。对植物群落α多样性指数随地形因子变化特征分析中发现，乔木层植物 Margalef 丰富度指数、Simpson 优势度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数均呈现中海拔和高海拔大于低海拔区域（P<0.05），平坡的 Margalef 丰富度指数显著高于陡坡和险坡区域（P<0.05），阴坡和半阳坡植物 Pielou 均匀度指数显著高于半阴坡区域（P<0.05），坡顶的 Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数显著高于下坡区域（P<0.05）；地形因子对灌木层植物α多样性指数均无显著性影响；藤本层植物α多样性指数主要受海拔影响，中海拔的 Margalef 丰富度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数显著高于低海拔区域（P<0.05）。



A. 乔木层α多样性指数；**B**. 灌木层α多样性指数；**C**. 藤本层α多样性指数；**1**. 低海拔；**2**. 中海拔；**3**. 高海拔；**4**. 平坡；**5**. 斜坡；**6**. 陡坡；**7**. 急坡；**8**. 险坡；**9**. 阴坡；**10**. 半阴坡；**11**. 阳坡；**12**. 半阳坡；**13**. 坡顶；**14**. 上坡；**15**. 中坡；**16**. 下坡；不同小写字母表示α多样性指数的差异性（$P<0.05$）。

A. Tree layer α diversity index; **B**. Shrub layer α diversity index; **C**. Vine layer α diversity index; **1**. Low altitude; **2**. Medium altitude; **3**. High altitude; **4**. Flat slope; **5**. Slope; **6**. Steep slope; **7**. Sharp slope; **8**. Risky slope; **9**. Shady aspect; **10**. Semi-shady aspect; **11**. Sunny aspect; **12**. Semi-sunny aspect; **13**. Top of the gradient; **14**. Uphill; **15**. Mid gradient; **16**. Downhill; Different lowercase letters indicate variability in the α diversity index ($P<0.05$).

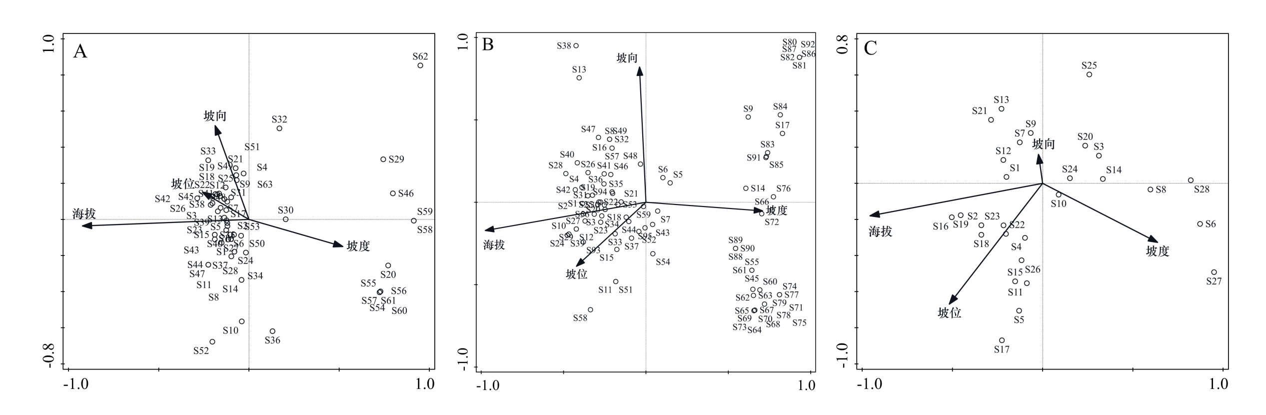
图 1　地形因子对 FAST 周边喀斯特植物群落α多样性指数的影响

Fig.1　Influence of topographic factors on the α-diversity index of the Karst plant communities around FAST

2.2 地形因子对 FAST 周边植物群落物种空间分布的影响

对 FAST 周边植物物种空间分布与地形因子典范对应分析（CCA），乔木层植物 CCA 排序如图 2A 所示，细叶青冈（*Quercus shennongii*）、水青冈（*Fagus longipetiolata*）、青冈等物种在排序轴的左上方，主要分布在较高海拔和上坡区域；苦木（*Picrasma quassioides*）、香槐（*Cladrastis wilsonii*）、云南樟（*Cinnamomum glanduliferum*）等物种在排序轴的右下方，主要分布在坡度较陡坡、阴坡和低海拔区域。

灌木层植物 CCA 排序如图 2：B，扁核木（*Prinsepia utilis*）、短绒槐（*Sophora velutina*）、直角荚蒾（*Viburnum foetidum*）等物种在排序轴的左下方，主要分布在较高海拔和上坡区域；香叶树、三对节（*Rotheca serrata*）、西南栒子（*Cotoneaster franchetii*）等物种在排序轴的右下方，主要分布在较陡坡、低海拔和阴坡区域。藤本层植物 CCA 排序如图 2：C，藤黄檀、雀梅藤、皱叶雀梅藤（*Sageretia rugosa*）等物种在排序轴的左上方，主要分布在较阳坡和缓坡区域；亮叶鸡血藤（*Millettia nitida*）、花叶菝葜（*Smilax guiyangensis*）、短梗南蛇藤（*Celastrus rosthornianus*）等物种在排序轴的左下方，主要分布在较高海拔、上坡和缓坡区域。



A. 乔木层 CCA 排序图；**B**. 灌木层 CCA 排序图；**C**. 藤本层 CCA 排序图。

A. CCA ordering diagram of tree layer; **B**. CCA ranking map of shrub layer; **C**. CCA ranking map of vine layer.

图 2　FAST 周边植物群落 CCA 排序图

Fig.2　CCA ordination map of the plant communities around FAST

由表 2 可知，FAST 周边植物群落地形因子的重要性呈现海拔>坡度>坡位>坡向的趋势，海拔和坡度对乔木层、灌木层、藤本层植物群落物种的空间分布均有显著性影响（$P<0.05$）。

表 2　FAST 周边植物群落 CCA 重要性排序和显著性检验

Table 2　Results of CCA importance ranking and significance testing of plant communities around FAST

地形因子 Topographical factor	乔木层 Tree layer				灌木层 Shrub layer				藤本层 Vine layer			
	重要性排序 Importance ranking	解释变量 Explanatory variable（%）	*F* 值 *F* value	*P* 值 *P* value	重要性排序 Importance ranking	解释变量 Explanatory variable（%）	*F* 值 *F* value	*P* 值 *P* value	重要性排序 Importance ranking	解释变量 Explanatory variable（%）	*F* 值 *F* value	*P* 值 *P* value
海拔 Altitude	1	11.8	3.0	0.002**	1	10.5	2.8	0.002**	1	8.5	2.1	0.002**
坡度 Slope	2	5.4	1.4	0.048*	2	7.0	1.8	0.004**	2	6.1	1.5	0.036*
坡位 Gradient	3	4.0	1.0	0.404	3	5.2	1.3	0.070	3	5.9	1.4	0.066
坡向 Aspect	4	3.6	0.9	0.696	4	4.4	1.1	0.184	4	3.0	0.7	0.914

注：$^{*}P<0.05$, $^{**}P<0.01$

Note: $^{*}P<0.05$, $^{**}P<0.01$

2.3 基于海拔和坡度的β多样性分析

由 CCA 的显著性检验得到海拔和坡度对 3 种植物群落物种的空间分布均有显著性影响（$P<0.05$），故采用 Jaccard 相似性指数对海拔和坡度展开β多样性分析。FAST 周边植物群落沿海拔的β多样性分析如图 3 所示，乔木层、灌木层、藤本层植物群落在中海拔—高海拔区域 Jaccard 相似性指数最高。乔木层和藤本层植物群落在低海拔—高海拔区域 Jaccard 相似性指数最低；灌木层在低海拔—中海拔区域 Jaccard 相似性

指数最低。FAST 周边植物群落沿坡度的β多样性分析如图 4 所示，乔木层植物群落在平坡—急坡区域 Jaccard 相似性指数最高；灌木层和藤本层植物群落在平坡—陡坡区域 Jaccard 相似性指数最高。乔木层、灌木层、藤本层植物群落在缓坡—险坡区域 Jaccard 相似性指数最低。

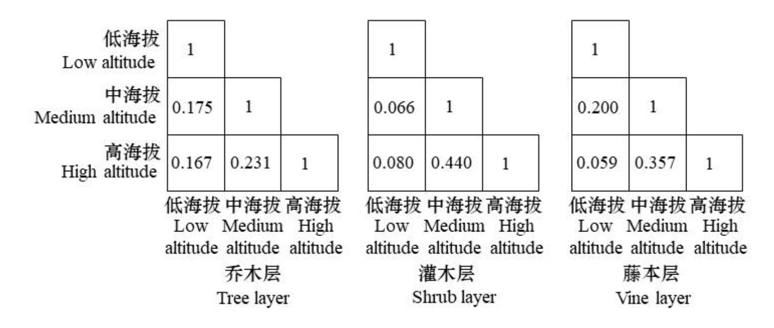


图 3　FAST 周边植物群落沿海拔梯度的 Jaccard 相似性指数特征

Fig.3　Jaccard similarity index characteristics of plant communities around FAST along the altitude gradient

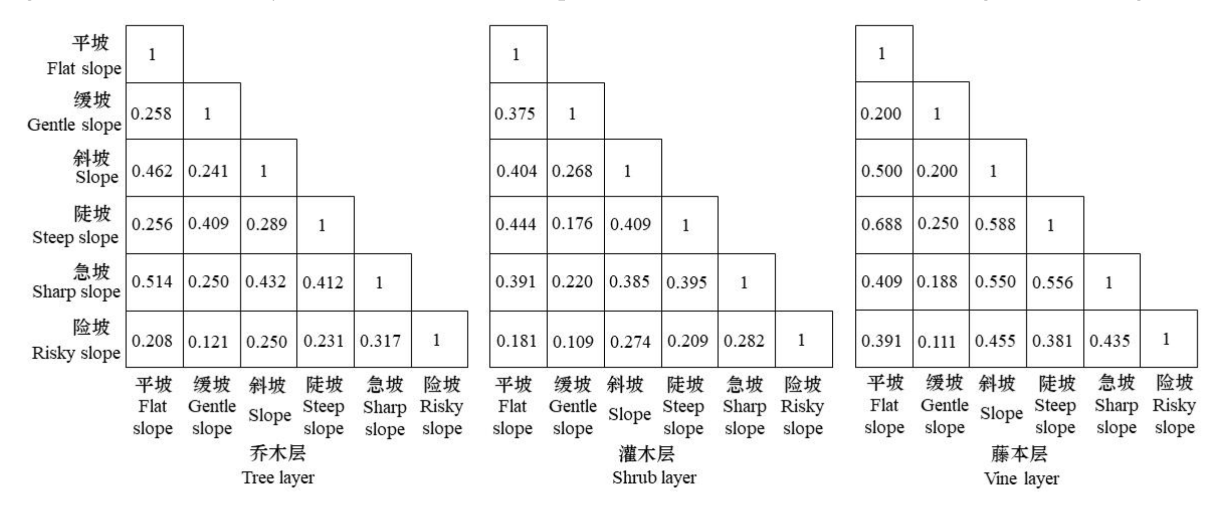


图 4　FAST 周边植物群落沿坡度梯度的 Jaccard 相似性指数特征

Fig.4　Jaccard similarity index characteristics of the plant communities around FAST along the slope gradient

3 讨论与结论

3.1 地形因子对 FAST 周边植物群落α多样性的影响

植物群落物种多样性及其空间分布与环境因子的关系受研究尺度的影响较大，在大尺度，气候条件起主导作用，在小尺度，地形因素起主导作用(熊斌梅等，2016)。物种多样性能体现植物群落的数量特征，FAST 周边植物群落物种多样性指数呈现灌木层>乔木层>藤本层，这与高伟等(2021)结果相似，表明 FAST 周边植物群落处于良好的演替和生长状态，灌木植物种类较丰富，对资源和空间的需求加大，随着群落的演替，更多的乔木物种幼树出现在灌木丛，故物种多样性指数较高。海拔能影响光照强度、土壤及水分资源的再分配，从而影响植物群落的组成及结构(黄甫昭等，2016)。乔木层和藤本层的 Margalef 丰富度指数、Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数随海拔的变化趋势不尽一致，但物种多样性总体上大致相同，均表现为中海拔和高海拔的物种多样性高于低海拔区域，这与熊斌梅等(2016)研究结果相似，说明各层物种多样性除受到海拔不同引起的光照、温度、土壤等小气候差异外，还在很大程度上受到人为干扰的影响，该研究的调查时间正处于 FAST 建设时期，旅游的开发和观光必然会增加周边的人为干扰，同时，喀斯特峰丛洼地生态环境脆弱，海拔的升高使水力侵蚀加剧、土壤运移加剧，这也为喜阳性耐瘠薄物种的迁入和定居提供了有利条件，高海拔光照较为充足，像枫香树和麻栎等植物，喜光且耐旱，在研究区域分布较广泛。

坡度作为喀斯特峰丛洼地重要的环境因子，通常可用来解释植物群落物种丰富度的空间分布(任学敏等，2014)。本研究在坡度较缓的区域，乔木层、灌木层、藤本层物种多样性均较高，可能是因为喀斯特峰丛洼地地貌多为峰丛与低洼地势交错分布，起伏变化剧烈，坡度变化明显，坡度越小，水力侵蚀作用越小，越

有利于水土资源保持，因此在坡度较平缓的区域物种存活率较高，物种多样性也随之升高。

坡向能够影响植物接受光照的强度，不同坡面接受的太阳辐射量不同，从而使土壤产生水热差异(李芹等，2019)。本研究中阳坡和半阳坡的物种多样性高于阴坡和半阴坡，这与邹文涛等(2014)的研究结果不同，可能是阳坡区域光照充足、土壤有机质含量较高等多种原因所致，另一方面，由于喀斯特峰丛洼地地貌的限制，调查样地的分布条件难以得到严格的把控，使得样地划分的均匀性较低，该误差是否会产生较大的影响还需要进一步的研究。

一般来说，坡顶和上坡区域的光照更充足，而下坡的土层更厚，土壤肥力更优(刘雅静等，2019)。本研究中乔木层和藤本层的物种多样性在坡顶高于下坡区域，而灌木层的物种多样性在下坡高于坡顶区域，这与刘广营等(刘广营等，2015)研究结果不同，可能是研究区域分布较广泛的乔木物种大多喜光，同时，藤本植物需攀附于其他植物或匍匐于地面生长，坡顶区域阳光充足，人为对林内干扰小，利于藤本和乔木植物的生长，而灌木物种普遍生物量更大，生长速率较快，对土壤肥力的需求更大，因此，灌木层的物种多样性在下坡高于坡顶区域。由此可见，地形因子对物种多样性的影响较复杂，不同植物群落类型、土壤条件等因素对物种多样性的响应规律也会有所差异。

3.2 地形因子对 FAST 周边植物群落物种空间分布的影响

地形因子影响植物群落微环境的温度、养分、光照等因素，进而影响植物群落的空间分布(李芹等，2019)。曹杨等(2005)认为 CCA 排序图能更好的解释植物物种与环境因子之间的相关性，更适合植物群落物种的空间分布研究。对 FAST 周边植物群落物种 CCA 分析发现，前两轴累积物种与环境关系的方差占比均超过 60%，表明 CCA 排序能较好的解释物种与环境之间的关系。CCA 排序将植物物种与地形因子结合起来，能综合反映植物群落物种的分布与地形因子之间的关系，箭头与排序轴夹角的大小表明该环境因子与排序轴的相关性(邵方丽等，2012)。大多数学者认为海拔是地形因子中影响植物空间分布与群落变化的主要地形因子，海拔变化会影响植物群落微环境，进而影响植物的分布(Fosaa, 2010; Raulings et al., 2010)。本研究发现海拔是影响 FAST 周边植物空间分布的重要地形因子，坡度次之，这与前人的研究结果相似(黄甫昭等，2014；熊斌梅等，2016；李芹等，2019)，海拔和坡度与植物群落的空间分布有显著的相关性，表现了生境的过滤作用对植物群落构建的影响，同时验证了研究区域不同植物群落物种的生态位特征。此外，不同植物群落类型对地形因子的响应规律有所差异，在坡度梯度下，灌木植物比乔木和藤本植物对生境的响应能力更敏感，研究区域灌木物种数量较多且分布较广泛，其中，异叶鼠李、白瑞香等灌木植物适应能力强但习性喜湿，常分布于阴湿处，故灌木物种对生境选择的要求更高。研究区域乔木植物的分布较为集中，而灌木和藤本植物的分布较为分散，表明乔木植物之间的竞争较激烈，而灌木和藤本植物群落相对较稳定。地形的变化对不同植物群落物种的空间分布影响不同，主要原因可能是地形部位的水文功能特征和地貌过程的强度不同，如坡位较低的区域易发生径流冲刷，坡度较陡的区域易发生山体崩塌等，喀斯特峰丛洼地地貌地势起伏变化大，坡度陡峭，在水力作用下水土迁移堆积作用明显，导致植物群落微生境破碎异质化，从而形成了不同的干扰体系，另一方面，不同生长习性的植物对地形的选择也会有所差异，因此，海拔和坡度是影响 FAST 周边植物群落空间分布的主导因素。本研究选取的 4 个地形因子对 3 种植物群落物种的空间分布的总解释量均较低，不能解释的变量大于 70%，可能是因为所选择的环境因子还不够充分，除地形因子外，相关研究表明土壤理化性质和气候因子也会影响植物物种的空间分布（温璐等，2011；张殷波等，2022)，此外，还可能存在人为干扰、种间相互作用、扩散抑制等因素，对此还有待进一步的研究。

3.3 FAST 周边海拔和坡度的β多样性特征

Jaccard 指数反映了不同生境之间物种的相似性程度，指数越小，说明物种组成差异越大(殷丽峰等，2021)。本研究中，在海拔和坡度梯度下的 Jaccard 相似性指数均表现为藤本层>灌木层>乔木层，随着群落的演替，相似性降低，物种之间的竞争力减小，植被群落趋于稳定。海拔梯度下的 Jaccard 相似性指数中有 7 对极为不相似，2 对中等不相似，表明 FAST 周边植物组成在海拔梯度下的差异性较大，随着植被的演替β多样性逐渐降低，物种间竞争趋缓，这与李梁等(2018)的研究结果相似，可能是由于物种对不同的地形条件具有选择性，另一方面，可能是由于样地划分的不均匀性所致。坡度梯度下的 Jaccard 相似性指数中有 13 对极为不相似，26 对中等不相似，6 对中等相似，在海拔和坡度梯度下 Jaccard 相似性指数 70%以上为极为不相似和中等不相似，表明 FAST 周边物种间的竞争较小，植物群落较为稳定。目前的普遍结论是随海拔的升高，β多样性指数逐渐减小(何斌等，2021)，本研究中，低海拔—中海拔到中海拔—高海拔，

3 种植物群落β多样性指数均呈升高趋势，这与普遍结论存在差异，可能是喀斯特峰丛洼地生境异质性程度较高和人为干扰频繁所致，植物群落之间总体上的差异性还可能与生境条件和植物的习性有关。在坡度梯度下，3 种植物群落沿坡度 Jaccard 相似性指数均呈先升高后降低趋势，乔木层、灌木层和藤本层分别在平坡—急坡、平坡—陡坡、平坡—陡坡的 Jaccard 相似性指数达到最大，说明在坡度较缓和坡度较陡的区域，植物群落之间总体差异小，共有的物种较多，随坡度的增加，植物群落进一步发育，群落间物种组成的差异不断增大，群落之间的生态距离逐渐变宽，到达一定的坡度后干扰减小，群落间的局部小环境更加稳定。

综上所述，物种对生境的选择具有差异性，海拔和坡度是影响 FAST 周边喀斯特峰丛洼地植物群落空间分布的关键因子。物种多样性能较好的反映植物群落在物种组成方面的差异，物种多样性不仅受地形因子的影响，还与生物因素和非生物因素有关，如温度、降水量、人类活动、植物功能性状等。因此，在今后的研究中还需增加相应的环境因子，进一步探究区域尺度的植物物种多样性及物种空间分布的内在机制，同时加强周边的生态保护，改善林分组成，为 FAST 周边以及喀斯特峰丛洼地提供一个良好的自然环境。

参考文献：

FOSAA AM, 2010. Biodiversity patterns of vascular plant species in mountain vegetation in the Faroe Islands[J]. Divers Distrib, 10(3): 217-223.

CHEN JQ, YANG SY, 2014. Terrestrial ecology research methods[M]. Beijing: Higher education press: 179-213. [陈吉泉，阳树英，2014. 陆地生态学研究方法[M]. 北京：高等教育出版社：179-213.]

CAO Y, SHANGGUAN TL, ZHANG JT, et al., 2005. The numerical classification and ordination of Oxytropis coerulea community of Wutai Mountain in Shanxi Province[J]. J Plant Resour Environ, 14(3): 1-6. [曹杨，上官铁梁，张金屯，等，2005. 山西五台山蓝花棘豆群落的数量分类和排序[J]. 植物资源与环境学报，14(3)：1-6.]

GAO W, HUANG SD, LIN JL, et al., 2021. Coupling relationships between community characteristics and species diversity of three forest types in subtropical China[J]. Chin J Trop Crops, 42(6): 1756-1763. [高伟，黄石德，林建丽，等，2021. 亚热带 3 种森林类型的群落特征与物种多样性的耦合关系[J]. 热带作物学报，42(6)：1756-1763.]

HUANG FZ, DING T, LI XK, et al., 2016. Species diversity for various associations along an altitudinal gradient in the karst seasonal rainforest in Nonggang[J]. Acta Ecol Sin, 36(14): 4509-4517. [黄甫昭，丁涛，李先琨，等，2016. 弄岗喀斯特季节性雨林不同群丛物种多样性随海拔的变化[J]. 生态学报，36(14)：4509-4517.]

HUANG FZ, WANG B, DING T, et al., 2014. Numerical classification of associations in a northern tropical Karst seasonal rain forest and the relationships of these associations with environmental factors[J]. Biodivers Sci, 22(2): 157-166. [黄甫昭，王斌，丁涛，等，2014. 弄岗北热带喀斯特季节性雨林群丛数量分类及与环境的关系[J]. 生物多样性，22(2)：157-166.]

HAO JF, WANG DY, LI Y, et al., 2014. Effect of altitude on structure and species diversity of *Cunninghamia lanceolata* plantation in Jiangyou District, Sichuan Province[J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 34(12): 2544-2552. [郝建锋，王德艺，李艳，等，2014. 海拔高度对江油地区杉木人工林群落结构和物种多样性的影响[J]. 西北植物学报，34(12)：2544-2552.]

HE B, Li Q, CHEN QL, et al., 2021. Altitudinal pattern of species diversity of *Pseudotsuga sinensis* community in Northwestern Guizhou, China[J]. Ecol Environ Sci, 30(6): 1111-1120. [何斌，李青，陈群利，等，2021. 黔西北黄杉群落物种多样性的海拔梯度格局[J]. 生态环境学报，30(6)：1111-1120.]

LOREAU M, MAZANCOURT C D, DUFFY E, 2013. Biodiversity and ecosystem stability: a synthesis of underlying mechanisms[J]. Ecol Lett, 16(2013): 106-115.

LONG CL, 2007. Comparison of species diversity in karst forest among different topography sites — A case study in Maolan natural reserve, Guizhou Province[J]. Carsol Sin, 26(1): 55-60. [龙翠玲，2007. 不同地形部位喀斯特森林物种多样性的比较研究——以贵州茂兰自然保护区为例[J]. 中国岩溶，26(1)：55-60.]

LONG WX, 2016. Plant ecology[M]. Beijing: Science Press: 84-185. [龙文兴，2016. 植物生态学[M]. 北

京：科学出版社：84-185.]
LI Q, RONG L, WANG M, et al., 2019. Effects of topography on diversity and distribution pattern of plant species in Karst Mountains Area[J]. Bull Soil Water Conserv, 39(6): 27-34. [李芹， 容丽，王敏，等，2019. 地形对喀斯特山地植物物种多样性及分布格局的影响[J]. 水土保持通报，39(6)：27-34.]
LI CJ, SUN Q, CHEN Z, at al., 2013. Effects of roadside slope gradient on plant diversity during revegetation[J]. Bull Bot Res, 33(4): 477-483. [李成俊，孙琦，陈璋，等，2013. 道路边坡坡度对植被恢复中物种多样性的影响研究[J]. 植物研究，33(4)：477-483.]
Li L, Zhang JJ, Chen BQ, et al., 2018. Dynamic changes of vegetation communities in a small watershed been chronically closed in Loess Plateau in Western Shanxi Province[J]. Sci Silv Sin, 54(2): 1-9. [李梁，张建军，陈宝强，等，2018. 晋西黄土区长期封禁小流域植被群落动态变化[J]. 林业科学，54(2)：1-9.]
LIU YJ, ZHANG SY, LI J, et al., 2019. Effect of slope position and density on the species diversity of understory vegetation and productivity of *Eucalyptus* Plantation[J]. For Environ Sci, 35(4): 48-55. [刘雅静，张书源，李静，等，2019. 坡位和密度对桉树林生产力和林下植被多样性的影响[J]. 林业与环境科学，35(4)：48-55.]
LIU GY, MA CM, GUO YM, et al., 2015. Impact of slope position on the growth and undergrowth species diversity of *Larix principis-rupprechtii* plantation[J]. Hebei J For Orchard Res, 30(1): 5-8. [刘广营， 马长明，郭延朋，等，2015. 坡位对华北落叶松生长及林下物种多样性的影响[J]. 河北林果研究，30(1)：5-8.]
MA JM, LU QG, LU P, at al., 2021. Study on species diversity under different forest types in Chongling Watershed[J]. For Ecol Sci, 36(02): 111-118. [马佳明，陆贵巧，赵鹏，等，2021. 崇陵流域不同林分类型下物种多样性研究[J]. 林业与生态科学，36(02)：111-118.]
NIU YJ, ZHOU JW, YANG SW, et al., 2017. Relationships between soil moisture and temperature, plant species diversity, and primary productivity in an alpine meadow considering topographic factors[J]. Acta Ecol Sin, 37(24): 8314-8325. [牛钰杰，周建伟，杨思维，等，2017. 基于地形因素的高寒草甸土壤温湿度和物种多样性与初级生产力关系研究[J]. 生态学报，37(24)：8314-8325.]
REN XM, YANG GH, ZHU Y, et al., 2014. Effect of environmental variables on species composition and richness of alpine vegetation in Taibai Mountain[J]. Acta Ecol Sin, 34(23): 6993-7003. [任学敏，杨改河，朱雅，等，2014. 环境因子对太白山高山植被物种组成和丰富度的影响[J]. 生态学报，34(23)：6993-7003.]
RAULINGS EJ, MORRIS K, ROACHE MC, et al., 2010. The importance of water regimes operating at small spatial scales for the diversity and structure of wetland vegetation[J]. Freshwater Biol, 55(3): 701-715.
SHENG MY, XIONG KN, CUI GA, et al., 2015. Plant diversity and soil physical-chemical properties in karst rocky desertification ecosystem of Guizhou, China[J]. Acta Ecol Sin, 35(2): 434-448. [盛茂银，熊康宁，崔高仰，等，2015. 贵州喀斯特石漠化地区植物多样性与土壤理化性质[J]. 生态学报，35(2)：434-448.]
SHAO FL, YU XX, ZHENG JK, et al., 2012. Relationships between dominant arbor species distribution and environmental factors of shelter forests in the Beijing Mountain area[J]. Acta Ecol Sin, 32(19): 6092-6099. [邵方丽，余新晓，郑江坤，等，2012. 北京山区防护林优势树种分布与环境的关系[J]. 生态学报，32(19)：6092-6099.]
SONG TQ, PENG WX, ZENG FP, et al., 2010. Spatial pattern of forest communities and environmental interpretation in Mulun National Nature Reserve, Karst cluster-peak depression region[J]. Chin J Plant Ecol, 34(3): 298-308. [宋同清，彭晚霞，曾馥平，等，2010. 木论喀斯特峰丛洼地森林群落空间格局及环境解释[J]. 植物生态学报，34(3)：298-308.]
TIAN A, LI WJ, WANG JG, et al., 2019. Influence of topographic factors on the community characteristics of *Sophora davidii* in rocky desertification area of Guanling County[J]. J W Chin For Sci, 50(3): 34-41. [田奥，李苇洁，王加国，等，2021. 关岭县石漠化地区地形因子对白刺花群落特征的影响[J]. 西部林业科学，50(3)：34-41.]
WANG HD, 2016. Influence study of soil and topography factors on vegetation restoration in an opencast coal mine dump in a loess area[D]. Beijing: China University of Geosciences: 6-8. [王洪丹，2016. 黄土区露天煤矿排土场土壤与地形因子对植被恢复的影响研究[D]. 北京：中国地质大学：6-8.]

WANG B, REN XX, HU W, 2011. Assessment of forest ecosystem services value in China[J]. Sci Silv Sin, 47(2):145-153. [王兵，任晓旭，胡文，2011. 中国森林生态系统服务功能及其价值评估[J]. 林业科学，47(2)：145-153]

WEN PY, JIN GZ, 2019. Effects of topography on species diversity in a typical mixed broadleaved-Korean pine forest[J]. Acta Ecol Sin, 39(3): 945-956. [温佩颖，金光泽，2019. 地形对阔叶红松林物种多样性的影响[J]. 生态学报，39(3)：945-956.]

WEN L, DONG SK, ZHU L, et al., 2011. The effect of natural factors and disturbance intensity on special heterogeneity of plant diversity in alpine meadow [J]. Acta Ecol Sin, 31(7): 1844-1854. [温璐，董世魁，朱磊，等，2011. 环境因子和干扰强度对高寒草甸植物多样性空间分异的影响[J]. 生态学报，31(7)：1844-1854.]

WU H, ZHANG JL, FAN YW, et al., 2013. Numerical classification and ordination of forest communities in Caohai basin[J]. J Nanjing For Univ (Natur Sci), 37(03): 47-52. [吴华，张建利，范怡雯，等，2013. 草海流域植物群落结构数量分类与排序[J]. 南京林业大学学报(自然科学版)，37(03)：47-52.]

XIONG BM, LEI G, WANG ZX, et al., 2016. Effect of topography on plant species richness and distribution in Qizimei Mountains Nature Reserve[J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 36(11): 2307-2313. [熊斌梅，雷耘，汪正祥，等，2016. 地形对七姊妹山自然保护区植物丰富度及分布格局的影响[J]. 西北植物学报，36(11)：2307-2313.]

XIE G, LIAO XF, XIE YG, et al., 2018. Investigation and evaluation of local features medicinal herbs resources in FAST surrounding area[J]. Guizhou Agr Sci, 46(8): 109-112. [谢刚，廖小锋，谢元贵，等，2018. FAST 周边区域地方特色药用植物资源调查与评价[J]. 贵州农业科学，46(8)：109-112.]

YANG Y, ZHANG XT, XIAO L, et al., 2019. Effect of Forest-fire rehabilitation time on plant diversity in Daxing'an Mountains, Northeastern China[J]. Bull Bot Res, 39(4): 514-520. [杨扬，张喜亭，肖路，等，2019. 火灾恢复年限对大兴安岭森林乔灌草多样性及优势种影响[J]. 植物研究，39(4)：514-520.]

YIN LF, LI W, REN BB, 2021. Plant diversity and its community characteristics of Urban Greenways of Beijing[J]. J W Chin For Sci, 50(02): 28-34. [殷丽峰，李薇，任斌斌，2021. 北京城市绿道植物多样性及其群落特征[J]. 西部林业科学，50(02)：28-34.]

ZHANG QP, 2019. Effects of topography on plant diversity patterns in Alpine Meadow using Multi-scale analysis taking Hezuo City as an example[D]. Nanjing: Nanjing Normal University: 13-15. [张起鹏，2019. 地形对高寒草甸植物多样性影响的多层次分析[D]. 南京：南京师范大学：13-15.]

ZHU L, JIN YL, CONG RH, et al., 2018. Effects of environmental factors and interspecific competition in community biodiversity pattern[J]. Arid Zone Res, 35(6): 1427-1435. [朱羚，金一兰，丛日慧，等，2018. 环境因素及种间竞争在群落多样性格局中的作用[J]. 干旱区研究，35(6)：1427-1435.]

ZHANG LY, QI JQ, LIU PY, et al., 2018. Effects of stand density on community structure and species diversity of *Eucalyptus robusta* plantation[J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 38(1): 166-175. [张柳桦，齐锦秋，柳苹玉，等，2018. 林分密度对桉树人工林群落结构和物种多样性的影响[J]. 西北植物学报，38(1)：166-175.]

ZHANG SH, 2020. Succession law of plant communities and structural management techniques in the Karst Rocky Desertification[D]. Guiyang: Guizhou Normal University: 4-6. [张仕豪，2020. 喀斯特石漠化植物群落演替规律与结构经营技术[D]. 贵阳：贵州师范大学：4-6.]

ZHANG HH, 2008. Study on species diversity characteristics of forest community in Kanasi Tourism Region of Xinjiang[D]. Wulumuqi: Xinjiang Agricultural University: 5-7. [张荟荟，2008. 新疆喀纳斯旅游区森林群落物种多样性特征研究[D]. 乌鲁木齐：新疆农业大学：5-7.]

ZHAO ZL, ZHAO WQ, LI W, et al., 2020. Study on the spatial and temporal evolution characteristics and influence mechanism of fractional vegetation coverage around FAST[J]. J Green Sci Technol, 2020(14): 1-7. [赵祖伦，赵卫权，李威，等，2020. FAST 周边植被覆盖度时空演变特征及影响机制研究[J]. 绿色科技，2020(14)：1-7.]

ZHANG JL, WU H, YU LF, et al., 2013. Study on dominant species of karst wetland watershed forest based on

the community quantitative characteristics[J]. Ecol Environ Sci, 22(1): 58-65. [张建利，吴华，喻理飞等，2013. 基于群落数量特征的喀斯特湿地森林群落优势种分析[J]. 生态环境学报，22(1)：58-65.]

ZHANG YB, QIN H, MENG QX, et al., 2022. Spatial patterns of and factors influencing species diversity in the forest communities of China's Taihang Mountains[J]. Chin J Appl Environ Biol, 28(2): 331-338. [张殷波，秦浩，孟庆欣，等，2022. 太行山森林群落物种多样性空间格局及其影响因素[J]. 应用与环境生物学报，28(2)：331-338.]

ZOU WT, JIANG Y, YIN GT, et al., 2014. Biodiversity comparison of forestland with different altitude or aspect in Shimen National Forest Park[J]. J Centr S Univ For Technol, 34(4): 77-81. [邹文涛，姜艳，尹光天，等，2014. 石门森林公园不同海拔或坡向林地物种多样性的比较[J]. 中南林业科技大学学报，34(4)：77-81.]